



Sintesis ZnO:Al Sebagai Bahan Transparent Conducting Oxide (TCO) dengan Metode *Spray Pyrolysis*

Widiyastuti, Siti Bahriyah, Salto Pakendek, Kusdianto, Suci Madhania, Sugeng Winardi

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Telp (031) 5924448, e-mail: widi@chem-eng.its.ac.id

Abstract

ZnO:Al particles are widely used as semiconductor material in various fields of technology, such as transparent conducting oxide (TCO). Synthesis of ZnO:Al particles using spray pyrolysis method has many advantages. The generated particles are relatively homogenous size distribution, spherical, and easily adjusted the particle size in range nano-submicrometer. Here, we studied the effect of doping concentration (1-4 at.%), operation temperature (500-900°C) and carrier gas flow rate (2-4 L/min) on the characteristics of the generated particles including morphology, crystallinity, and transparency. In order to analyse the morphology, crystallinity, and transparency of the generated particles, we used Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction (XRD), dan UV-Vis spectrophotometer, respectively. The optimum condition for the highest crystallinity and transparency was obtained by particles synthesized using doping concentration of 2 at.%, furnace of 900°C and carrier gas flow rate of 2 liter/minute

Keywords: *Al doped ZnO, transparent conducting oxide, particle morphology, crystalline size, transparency*

Pendahuluan

Saat ini serbuk *zinc oxide* (ZnO) sebagai material semikonduktor dengan lebar celah pita energi besar (3,37 eV) telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang teknologi. Salah satu aplikasinya adalah sebagai *transparent conducting oxide* (TCO) yang digunakan di berbagai peralatan optikal karena sifatnya yang memiliki konduktivitas dan transparansi yang tinggi, stabilitas yang bagus, tidak beracun, serta resistivitas yang rendah ($3,7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) (Kim dkk, 2000). *Transparent conducting oxide* (TCO) diaplikasikan pada aspek komputasi *liquid crystal displays* (LCD), aspek alternatif energi yaitu *solar cell*, dan aspek teknologi yang berupa sensor gas. Dalam aplikasinya di berbagai bidang teknologi ini, karakteristik partikel ZnO yang meliputi morfologi, kristalinitas, dan sifat optikal menjadi parameter penting. Sehingga hal inilah yang mendorong berkembangnya penelitian terhadap partikel ZnO dengan skala industri.

Lapisan tipis ZnO murni tidak stabil terhadap lingkungan yang korosif, seperti misalnya, adsorpsi oksigen pada lapisan tipis menurunkan konduktivitas elektrik dan juga mempengaruhi morfologi dari permukaan partikel. Morfologi partikel sangat mempengaruhi besar cahaya yang melewati dan diteruskan oleh partikel. Untuk menstabilkan sistem ZnO terhadap perubahan seperti itu, doping dengan berbagai elemen yang berbeda telah dilakukan

(Jimenez-Gonzales dkk, 1998). Berbagai tipe dopan yang pernah dicoba adalah dari golongan IIIA pada sistem periodik unsur (B, Al, Ga, In) dan yang paling optimum adalah dengan aluminium (Alaeddine dkk, 2009). Untuk itu pengaruh suhu *furnace*, laju alir gas pembawa, dan konsentrasi doping pada tekanan atmosfer terhadap karakteristik partikel ZnO:Al yang dihasilkan dengan metode aerosol *spray pyrolysis* dipelajari dalam penelitian ini.

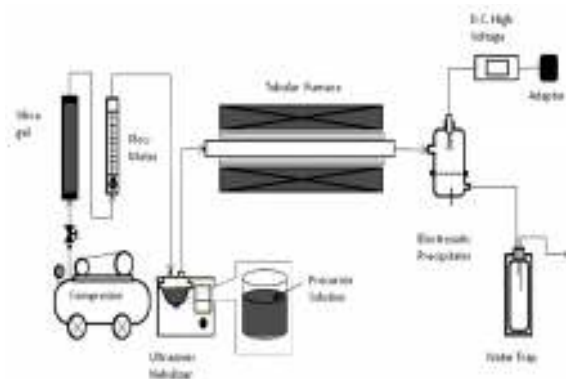
Landasan Teori

Metode aerosol merupakan metode yang paling modern untuk menghasilkan partikel dengan kristalinitas, konduktivitas dan transparansi yang tinggi, morfologi teratur, berbentuk bulat, dan memiliki kemurnian tinggi. *Spray pyrolysis* merupakan metode yang diadopsi untuk membuat serbuk yang berukuran submikrometer. Suhu reaksi di dalam *furnace* dan waktu tinggal serbuk di dalam *furnace* adalah parameter yang penting untuk menentukan karakteristik serbuk. Secara umum metode *spray pyrolysis* biasanya mengikuti prinsip "satu droplet menghasilkan satu partikel" untuk menghasilkan partikel produk berukuran mikrometer, submikrometer ataupun nanometer tergantung konsentrasi prekursor. Terjadinya aglomerasi pada metode ini mudah untuk dihindari hanya dengan mengatur kondisi operasi reaktor dan laju alir gas pembawa.

Metodologi Penelitian

Metode *spray pyrolysis* yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga alat utama, yakni atomizer, *tubular electrical furnace*, dan penangkap partikel seperti ditunjukkan pada Gambar 1. *Ultrasonic nebulizer* (NE-U17, Omron Healthcare Co.Ltd., Tokyo, Japan) berfungsi sebagai atomizer atau penghasil droplet dari larutan prekursor menggunakan gelombang ultrasonik. Droplet yang terbentuk kemudian dibawa oleh udara bebas bertekanan yang melalui kompresor (1 HP 8L, Krisbow) yang telah dilengkapi dengan *oil filter* dan *lubricator* serta dihubungkan dengan pipa kaca yang berisi *silica gel* untuk mendapatkan udara, sebagai gas pembawa droplet yang benar-benar kering, *oil free*, dan *moisture free*, menuju *ceramic tube* yang berada didalam *tubular electrical furnace* (ARF 40M). *Ceramic tube* ini memiliki diameter dalam 21 mm dan panjang 300 mm dan dilengkapi pula dengan *thermocouple* dan *temperature controller* sebagai pengontrol suhu. Evaporasi, pengeringan dan proses dekomposisi partikel terjadi di sepanjang *furnace*. Partikel produk yang terbentuk selanjutnya dialirkan menuju *powder collector*, yaitu *electrostatic precipitator* yang menggunakan sumber energi *DC High Voltage* dan dijaga suhunya pada 150°C untuk mencegah terjadinya kondensasi uap air. Tahapan akhir adalah melewati gas buang dalam *water trap* untuk dilakukan pencucian gas agar aman untuk dibuang ke udara luar. Partikel yang dihasilkan pada eksperimen ini terkumpul dalam substrate kaca yang ada dalam *powder collector*.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kristal $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 99,5% (E. Merck, D-6100 Darmstadt, F.R. Germany) dengan sumber doping Aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 99,5% (E. Merck, D-6100 Darmstadt, F.R. Germany) yang dilarutkan dengan aquades. Variabel berubah yang digunakan adalah temperature *furnace* pada 500-900°C, laju alir gas pembawa 2-4 liter/menit, dan konsentrasi doping 1-4% at. Partikel yang dihasilkan kemudian diamati menggunakan teknik SEM (*Scanning electron microscope*) (Zeiss EVO MA dan LS series, Cambridge, England) untuk analisis morfologinya, XRD (*X-ray Diffraction*) dengan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ 1,54 Å, 40 kV, 30 mA (X'pert Philips, Netherland) untuk analisis derajat kristalinitasnya, dan *UV-vis spectrophotometer* (Thermo Scientific, Genesys 10uv Scanning, USA) untuk analisis sifat optikal dengan menggunakan range panjang gelombang 300-800 nm.



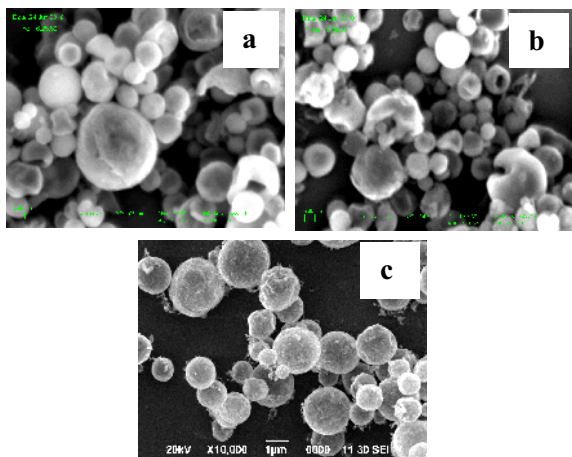
Gambar 1. Skema Rangkaian Alat Proses Pembentukan Partikel Dengan Metode *Spray Pyrolysis*

Hasil Dan Pembahasan

Pengaruh Suhu Furnace Terhadap Produk Partikel

Suhu furnace memegang peranan penting untuk menyempurnakan reaksi kimia dan secara signifikan mempengaruhi laju penguapan dari droplet dan proses pengkristalan dari partikel yang dihasilkan. Pengaruh suhu *furnace* (500-900°C) terhadap morfologi produk partikel dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2 (c), terlihat bahwa dengan suhu *furnace* 900°C permukaan partikel lebih halus dibandingkan pada suhu 700°C meskipun terlihat masih terdapat partikel yang pecah karena pada suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pecahnya partikel yang telah terbentuk. Secara umum partikel yang dihasilkan berbentuk bulat (*sphere*). Dari data hasil perhitungan untuk ketiga variabel suhu tersebut diperoleh partikel yang berukuran submikron. Diameter rata-rata partikel ZnO:Al pada suhu 900°C, 700°C, dan 500°C berturut-turut adalah 813,29 nm, 881,65 nm, dan 908,67 nm. Pada suhu yang lebih tinggi, proses evaporasi pelarut berlangsung lebih sempurna, pori-pori atau lubang diantara partikel menyusut, dan mempercepat kontak interpartikel serta reaksi dekomposisi sehingga terjadi penurunan ukuran partikel pada suhu yang lebih tinggi.

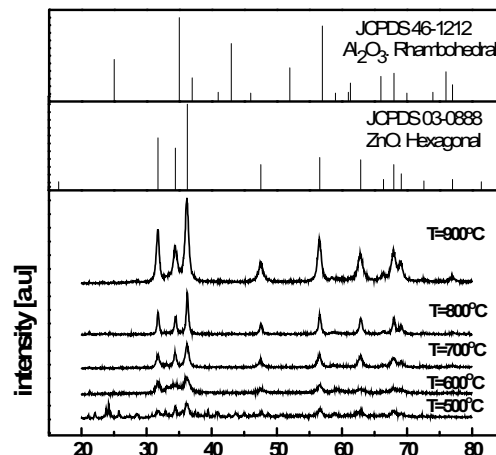
Gambar 3 menunjukkan pola XRD dari ZnO:Al pada berbagai suhu. Dapat diketahui bahwa partikel yang terbentuk adalah ZnO:Al dan kristalinitas partikel ini semakin meningkat apabila suhu dalam *furnace* semakin tinggi. Pada suhu tinggi, 900°C, *peak* dari ZnO terlihat yang tajam dan jelas, partikel terbentuk memiliki kristalinitas tinggi yang ditandai dengan *peak* yang tajam dan intensitas yang paling tinggi dibandingkan kristalinitas pada kondisi suhu yang lebih rendah. Hal ini disebabkan semakin tinggi suhu, maka proses evaporasi dan reaksi interpartikel semakin sempurna sehingga pembentukan kristal semakin sempurna pula. Hasil ini berkesuaian pula dengan Hidayat dkk (2008) dimana peningkatan suhu meningkatkan kecepatan reaksi dekomposisi prekursor.



Gambar 2. Hasil SEM dengan variabel suhu *furnace* (a) 500°C (b) 700°C (c) 900°C

Tabel 1 merupakan hasil analisis kuantitatif yang menunjukkan bahwa suhu *furnace* dapat mempengaruhi komposisi partikel produk. Pada suhu rendah, 500-600°C, kandungan ZnO dalam partikel hanya 67-85%, sementara kandungan lainnya adalah pengotor berupa Al_2O_3 dan ukuran kristalnya pun juga kecil, 13-14 nm. Sedangkan pada suhu 700-900°C, kandungan ZnO pada partikel produk meningkat hingga 97-99,5% dengan ukuran kristal yang lebih besar, yaitu 19-20 nm. Dari hasil ini, didapatkan bahwa suhu optimum untuk menghasilkan ukuran kristal yang besar dan pengotor yang lebih sedikit pada suhu 900°C. Hal ini dikarenakan semakin tinggi suhu, laju nukleasi atau pertumbuhan partikel semakin cepat sehingga pertumbuhan kristal semakin sempurna.

Gambar 4 menunjukkan hasil analisis sifat optik, yaitu transparansi yang ditunjukkan dengan presentase transmittan yang dipengaruhi oleh suhu *furnace* menggunakan *UV-Vis Spectrophotometer*. Dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan transmittansi dengan semakin tingginya suhu *furnace*. Pada suhu operasi 500°C diperoleh transmittan hanya 12,5% dan semakin meningkat dengan semakin tingginya suhu *furnace* yang digunakan, hingga mencapai 67,8% pada suhu yang paling tinggi, yaitu 900°C. Dengan suhu yang lebih tinggi, tampak pada analisis SEM (Gambar 2), morfologi partikel yang dihasilkan lebih rata dengan ukuran diameter lebih kecil menyebabkan luas permukaan partikel lebih besar sehingga cahaya yang ditransmisikan lebih besar. Ukuran dan morfologi partikel sangat mempengaruhi besarnya transmittan (Hong dkk, 2006). Sehingga pada suhu yang tinggi, 800-900°C, *Aluminium zinc oxide* transparan pada rentang cahaya nampak, yaitu pada panjang gelombang 400-800 nm dengan tingkat transmittan antara 60-70%.



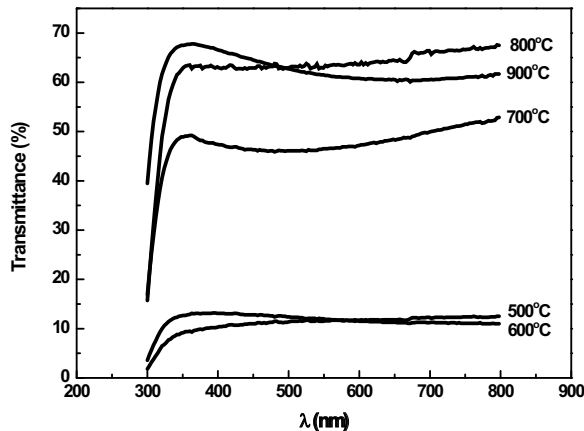
Gambar 3. Hasil analisis XRD untuk 0,5 M prekursor, 4% konsentrasi doping, dan laju alir udara 2 liter/menit dengan variabel suhu *furnace* (a) 500°C (b) 600°C (c) 700°C (d) 800°C (e) 900°C

Tabel 1. Hasil analisis kuantitatif untuk 0,5 M prekursor, 4% konsentrasi doping, dan laju alir udara 2 liter/menit dengan variabel suhu *furnace* 500°C-900°C

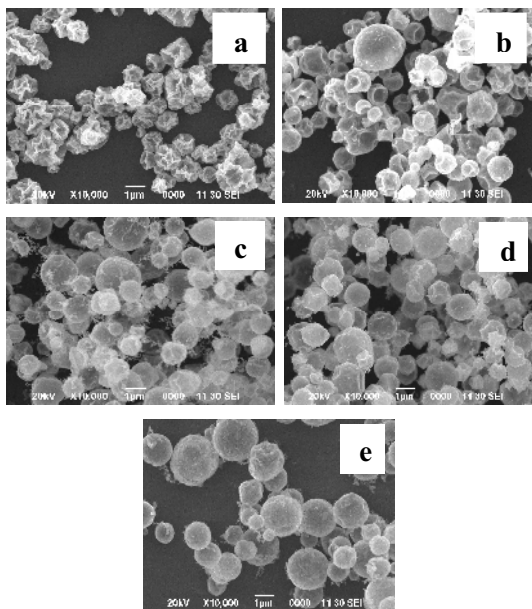
T (°C)	%massa ZnO	%massa Al	%massa Al_2O_3	%massa Zn	Crystallite size (nm)
500	67,3	0,29	31,59	0	14,37
600	85,38	0,7	12,79	1,18	13,1
700	97,41	0,33	1,77	0,13	20,97
800	99,25	0,07	0,68	0	19,52
900	99,59	0,15	0,26	0	20,63

Pengaruh Konsentrasi Doping Dalam Larutan Prekursor Terhadap Partikel Produk

Pengaruh konsentrasi doping 0-4% at. dalam larutan prekursor terhadap morfologi partikel dapat dilihat pada Gambar 5. Secara keseluruhan, tidak terjadi aglomerasi pada partikel yang dihasilkan. Tampak pada partikel oksida seng murni (Gambar 5(a)), morfologi partikel yang pecah, tidak teratur dan tidak berbentuk bulat (*sphere*) yang utuh. Dengan penambahan konsentrasi doping 1% at. (Gambar 5(b)), partikel ZnO:Al mulai berbentuk bulat dan permukaannya rata. Hasil yang sama juga terjadi pada konsentrasi doping 2-4% at. (Gambar 7 (c)-(e))). Namun, semakin besar konsentrasi doping yang digunakan, distribusi ukuran antar partikel semakin tidak merata. Hal ini dapat dilihat pada variabel konsentrasi doping yang paling besar yakni pada konsentrasi 4% at. (Gambar 5(e)).



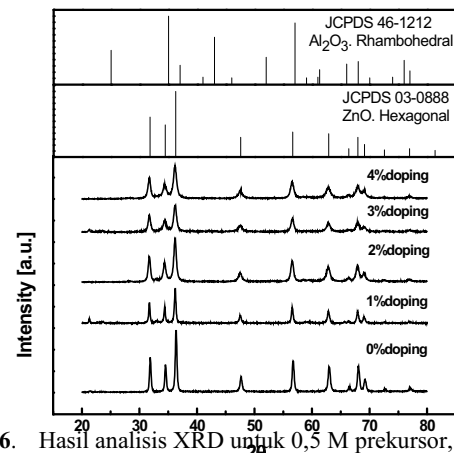
Gambar 5. Hasil analisis *UV-Vis Spectrophotometer* untuk 0,5 M prekursor, 4% at. konsentrasi doping, dan laju alir udara 2 liter/menit dengan variabel suhu *furnace* 500-900°C



Gambar 5. Hasil analisis SEM untuk 0,5 M prekursor, suhu 900°C, dan laju alir udara 2 liter/menit dengan variabel konsentrasi doping (a) 0% (b) 1% (c) 2% (d) 3% (e) 4%

Gambar 6 menunjukkan hasil analisis XRD perbandingan antara ZnO dengan konsentrasi doping 0-4% at. Tampak bahwa dengan menambahkan dopan Al 1-4% at. menghasilkan peak yang lebih rendah dengan lebar celah difraksi yang lebih lebar. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menambahkan dopan Al mengakibatkan penurunan tingkat kristalinitas yang ditunjukkan dengan penurunan peak dan menghasilkan celah difraksi yang lebih lebar (Alaeddine dkk, 2009). Selain itu, kristalinitas ZnO:Al paling optimum diperoleh pada penambahan doping sebesar 2% at. yang ditunjukkan dengan peak yang tajam dan intensitas

yang tinggi dibandingkan kristalinitas ZnO:Al yang lain. Sedangkan, ZnO dengan doping Al lebih dari 2% at. mengalami penurunan kristalinitas partikel. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya konsentrasi doping Al akan membentuk tegangan (*stresses*) oleh perbedaan dalam ukuran ion Zn dan Al yang jumlahnya semakin bertambah. Selain itu, dengan meningkatnya konsentrasi doping Al mengakibatkan gangguan keteraturan jarak antar ion-ionnya karena perbedaan jari-jari ionik antara Al dan Zn dapat mengakibatkan pemisahan ion Al dari *grain boundaries* (Ayadi dkk, 2008).



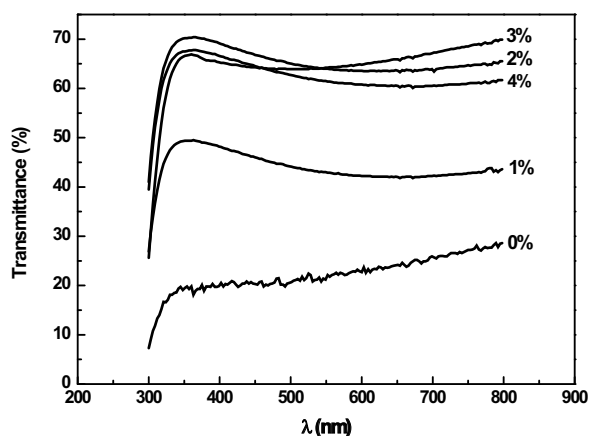
Gambar 6. Hasil analisis XRD untuk 0,5 M prekursor, suhu 900°C, dan laju alir udara 2 liter/menit dengan variabel konsentrasi doping (a) 0% (b) 1% (c) 2% (d) 3% (e) 4%

Tabel 2 menampilkan hasil analisis kuantitatif untuk variabel konsentrasi doping. Pada tabel tersebut, tampak bahwa pada ZnO murni tanpa doping dan dengan penambahan doping hanya 1%, tidak terdapat massa Zn pada partikel produk, Al yang terbentuk terletak di luar *grain boundaries* dari ZnO atau Al terselip pada satu kristal ZnO sehingga menghasilkan ukuran kristal 69 nm. Penambahan doping yang lebih banyak (2-4% at.) menyebabkan penurunan komposisi ZnO (98,6-99,5%) dan meningkatkan komposisi Al_2O_3 sebagai pengotor. Selain itu, penambahan doping Al 2-4% at. menyebabkan ukuran kristalnya menurun menjadi hanya 20-27 nm. Dari hasil analisis XRD, celah difraksi yang lebih rendah menghasilkan ukuran diameter kristalin yang lebih kecil, sehingga tingkat kristalinitasnya juga rendah. Hal ini dikarenakan adanya penggantian posisi dari Zn oleh Al selama pembentukan ZnO dengan doping Al. Radius dari ion Zn^{2+} lebih besar daripada Al^{3+} ($r_{\text{Al}} = 0,054$ nm dan $r_{\text{Zn}} = 0,074$ nm), sehingga menyebabkan penurunan ukuran kristal pada ZnO yang didoping dengan Al (Sahay, 2007).

Tabel 2. Hasil analisis kuantitatif untuk 0,5 M prekursor, suhu 900°C dan laju alir udara 2 liter/menit dengan konsentrasi doping 0-4%

Kons. Dop.	%massa ZnO	%massa Al	%massa Al ₂ O ₃	%massa Zn	Crystallite size (nm)
0%	100	0	0	0	69,26
1%	99,95	0,02	0,03	0	69,76
2%	99,43	0,29	0,26	0,26	27,64
3%	98,64	0,08	0,98	0,3	26,29
4%	99,59	0,15	0,26	0	20,63

Gambar 7 menunjukkan hasil analisis *UV-Vis Spectrophotometer* yang dapat diketahui bahwa dengan menambahkan dopan aluminium akan meningkatkan persentase transmitan dibandingkan hanya ZnO murni. Pada partikel ZnO murni, persen transmitan yang diperoleh hanya sebesar 28,8%. Nilai ini makin naik dengan semakin tingginya konsentrasi doping yang ditambahkan. Transmitan yang optimum diperoleh pada konsentrasi dopan 2% at. sebesar 70,4%. Dengan penambahan konsentrasi doping 2-4% at., partikel AZO transparan pada rentang cahaya nampak, yaitu pada panjang gelombang 400-800 nm dengan persen transmitan sebesar 65-70% (Hidayat dkk, 2008).



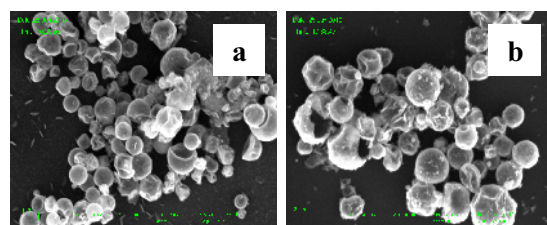
Gambar 7. Hasil analisis *UV-Vis spectrophotometer* untuk 0,5 M prekursor, suhu 900°C, dan laju alir udara 2 liter/menit dengan konsentrasi doping 0-4%

Pengaruh Laju Alir Udara Sebagai Carrier Gas Terhadap Partikel Produk

Dari hasil perhitungan didapatkan untuk kondisi pertama (Gambar 8 (a)) didapatkan ukuran partikel ZnO:Al berukuran submikrometer dengan diameter rata-rata 893,11 nm dengan morfologi berbentuk bulat, rata-rata ukuran partikel seragam, permukaan halus serta terjadi *soft aglomerat*. Hal ini menunjukkan bahwa terjadinya proses evaporasi pelarut serta dekomposisi prekursor yang menyebabkan terjadinya perubahan ukuran partikel menjadi skala submikron dengan mengasumsikan pembentukan partikel terjadi dengan mekanisme ODOP (*one droplet one particle*). Sementara pada kondisi kedua (Gambar 8 (b))

didapatkan ukuran partikel ZnO:Al berukuran mikrometer dengan diameter rata-rata 1,168 μm dengan rata-rata ukuran partikel seragam, visualisasi dari permukaan partikel terlihat kasar, terjadi *soft aglomerat* serta terlihat beberapa partikel yang tidak berbentuk bulat.

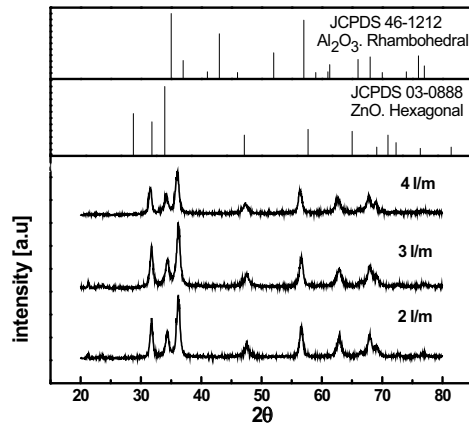
Peningkatan ukuran partikel dan penurunan kondisi morfologi ini dikarenakan dengan meningkatnya laju alir udara sebagai gas pembawa menyebabkan waktu tinggal dalam reaktor semakin singkat sehingga proses dekomposisi interpartikel kurang sempurna. Selain itu dengan laju alir udara lebih tinggi menghasilkan peluang bertumbukan semakin besar sehingga tampak bahwa dengan laju alir udara 4 liter/menit menghasilkan partikel dengan ukuran yang lebih besar daripada dengan laju alir udara 2 liter/menit.



Gambar 8. Hasil SEM dengan variabel *flowrate* udara sebagai *carrier gas* (a) 2 liter/menit (b) 4 liter/menit

Gambar 9 menampilkan hasil analisis XRD untuk variabel laju alir udara. Dari gambar tersebut dapat dilihat kristalinitas optimum pada laju alir udara 2 liter/menit dengan ditunjukkan intensitas yang tinggi dan peak yang tajam. Semakin meningkatnya laju alir udara sebagai gas pembawa menyebabkan waktu tinggal (*residence time*) pada reaktor semakin singkat dan reaksi evaporasi dan dekomposisi interpartikel berjalan tidak sempurna dan partikel bertumbukan secara tidak efektif pada suhu tinggi, sehingga menyebabkan kristalinitas partikel semakin menurun (Joni, 2009).

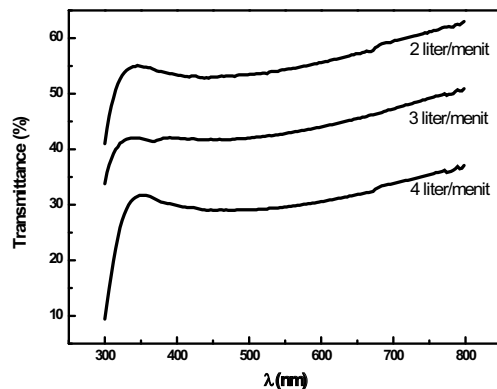
Tabel 3 menunjukkan hasil dari analisis kuantitatif yang dapat diketahui bahwa semakin besar laju alir udara maka fraksi massa ZnO semakin menurun dan ukuran kristal ZnO:Al juga semakin menurun dari 26 nm hingga 22 nm. Seperti yang telah dibahas sebelumnya bahwa semakin tinggi laju alir gas pembawa menyebabkan waktu tinggal dalam reaktor semakin singkat, sehingga semakin rendah konversi dari larutan prekursor yang akan mengalami reaksi evaporasi serta dekomposisi interpartikel (Sahay dan Nath, 2007). Dari hasil analisis kuantitatif diperoleh hasil optimum dengan komposisi ZnO:Al yang lebih besar dan ukuran diameter kristal yang lebih besar diperoleh pada laju alir udara sebagai gas pembawa sebesar 2 liter/menit.



Gambar 9. Hasil analisis XRD untuk konsentrasi prekursor 0,5 M, suhu 800°C, 2% konsentrasi doping dengan variabel laju alir udara 2-4 liter/menit

Tabel 3. Hasil analisis kuantitatif untuk 2% konsentrasi doping, 0,5 M konsentrasi prekursor, suhu 800°C, dengan variabel laju alir udara 2-4 liter/menit

carrier gas (lt/mnt)	% massa ZnO	% massa Al	% massa Al ₂ O ₃	% massa Zn	Cryst allite size (nm)
2	99,14	0,14	0,57	0,14	26,19
3	99	0,04	0,66	0,3	23,4
4	98,28	0,31	1,38	0,02	21,91



Gambar 10. Hasil analisis UV-Vis Spectrophotometer untuk 2% konsentrasi doping, Suhu 800°C, dan konsentrasi prekursor 0,5 M dengan variabel laju alir udara 2-4 liter/menit

Gambar 10 menunjukkan hasil analisis UV-Vis Spectrophotometer yang menunjukkan bahwa dengan laju alir 2-4 liter/menit menghasilkan persen transmittan berturut-turut 63%, 50,9%, dan 37,1%. Dengan kenaikan laju alir udara menyebabkan ukuran partikel semakin besar dan permukaan partikel yang tidak rata sehingga cahaya yang mengenai permukaan partikel akan lebih banyak dihamburkan daripada

diteruskan. Ukuran dan morfologi partikel sangat mempengaruhi besar transmittan (Hong dkk, 2006).

Kesimpulan

Semakin tinggi suhu furnace dan semakin rendah laju alir gas pembawa, maka semakin meningkatkan kristalinitas, transmittan, dan semakin menurunkan ukuran partikel AZO yang terbentuk. Kondisi operasi optimum untuk memenuhi tingkat kristalinitas, persen transmittan, dan ukuran partikel yang kecil adalah dengan suhu furnace 900°C, konsentrasi doping 2% at. dan laju alir gas pembawa 2 liter/menit.

Daftar Pustaka

- Alaeddine, A., Rachidi, I., Bahsoun, F., Mohanna, Y., Bazzi, O. and El Haj Hasan, F., 2008, "Influence of Al dopant on the optical and electrical properties of Zinc Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis", *Journal of Applied Sciences*, 9(8),1588-1592.
- Ayadi, B., ElMir, L., Alaya, S., Djessas, K., and Hernandez, E., 2007, "Effect of Doping Concentration on Transparency and Conductivity of ZnO:Al Thin Films". *Nanotechnology*, 18, 445072-445706.
- Hidayat, D., Ogi, T., Iskandar, F., Okuyama, K., 2008. "Single crystal ZnO:Al nanoparticles directly synthesized using low-pressure spray pyrolysis", *Materials Sciences and Engineering B*, 151 231-237.
- Hong, C.-S., Park, H.-H., Moon, J., Park, H.-H., 2006, "Effect of metal (Al, Ga, and In)-dopants and/or Ag-nanoparticles on the optical and electrical properties of ZnO thin films". *Thin Solid Films*, 515, 957-960.
- Jimenez-Gonzalez, A.E, Soto, U., Jose, A., Suarez-Parra, R., 1998, "Optical and Electrical Characteristic of Aluminium-doped ZnO Thin Films Prepared by Solgel Technique". *Journal of Crystal Growth*, 192, 430-438.
- Joni, I. M., Purwanto, A., Iskandar, F., Hazata, M., and Okuyama, K., 2009, "Intense UV-Light Absorption of ZnO Nanoparticles Prepared Using A Pulse Combustion-Spray Pyrolysis Method", *Chemical Engineering Journal* 155 433-441.
- Kim, H., Pique, A., Horwitz, J.S., Murata, H., Kafafi, Z.H., Gilmore, C.M., Chisey, D.B., 2000, "Effect of Aluminium doping on zinc oxide thin films growth by pulsed laser deposition for organic light emitting devices". *Thin Solid Films*, 377-378, 798-802.
- Sahay, P.P dan Nath, R.K., 2008, "Al-Doped Zinc Oxide Thin Films For Liquid Petroleum Gas (LPG) Sensors". *Sensors and Actuator B*, 133, 222-227.